

02 P20227

B1



19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift

10 DE 43 33 146 A 1

51 Int. Cl.<sup>5</sup>:  
G05D 13/00  
H 02 P 7/00

21 Aktenzeichen: P 43 33 146.7  
22 Anmeldetag: 29. 9. 93  
43 Offenlegungstag: 31. 3. 94

19270 U.S. PTO  
101763765



012204

DE 43 33 146 A 1

30 Unionspriorität: 32 33 31

30.09.92 JP P 286832/92

71 Anmelder:

Fuji Electric Co., Ltd., Kawasaki, Kanagawa, JP

74 Vertreter:

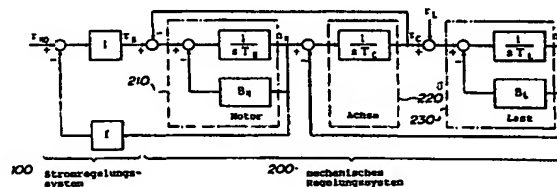
Tiedtke, H., Dipl.-Ing.; Bühling, G., Dipl.-Chem.;  
Kinne, R., Dipl.-Ing.; Pellmann, H., Dipl.-Ing.; Grams,  
K., Dipl.-Ing.; Link, A., Dipl.-Biol. Dr., Pat.-Anwälte,  
80336 München

72 Erfinder:

Tanisaka, Akihiko, Kawasaki, Kanagawa, JP

54 Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit eines Motors

57 Ein Verfahren zur Regelung eines mit variabler Geschwindigkeit betreibbaren Motors 210 mit einer über eine Achse 220 angekuppelten Last 230 umfaßt einen auf der Basis der  $H_\infty$ -Regelungstheorie gebildeten Regler K. Eine Empfindlichkeitsfunktion S und eine komplementäre Empfindlichkeitsfunktion T werden in diesem Regelungssystem definiert. Das Regelungssystem weist eine Regelstrecke G auf, die eine Referenzregelstrecke  $P_0$  (Motor) und eine Störungsregelstrecke  $\Delta$  (Schwingungen der Achse) umfaßt. Die Empfindlichkeitsfunktion S und die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion T werden jeweils mit Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  entsprechend multipliziert und die  $H_\infty$ -Norm bestimmt. Die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  wird in einem niedrigen Frequenzbereich auf einen großen Wert gesetzt, während die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  auf einen großen Wert in einem höheren Frequenzbereich gesetzt wird. Die Übertragungsfunktion K des Reglers wird aus der ermittelten  $H_\infty$ -Norm bestimmt. Die Empfindlichkeitscharakteristik wie das Ansprechverhalten oder das Reaktionsverhalten des Motors werden verbessert und die Verschleißunempfindlichkeit bzw. Verschleißfestigkeit werden erhöht.



DE 43 33 146 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 02. 94 408 013/669

16/40

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf ein Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit eines Motors unter Verwendung der  $H_\infty$ -Regelungstheorie.

- 5 Motoren bilden in vielen Anwendungsbereichen die Grundkraft- bzw. Grundantriebsquelle. Bei der Regelung der Geschwindigkeit des Motors wird nicht nur eine Empfindlichkeitscharakteristik, wie ein gutes Ansprechverhalten oder ein gutes Regelverhalten gefordert, sondern auch eine gut komplementäre Empfindlichkeitscharakteristik (eine sogenannte Verschleißfestigkeit bzw. Verschleißunempfindlichkeit, "robust stability"). Dabei bezieht sich die Empfindlichkeitscharakteristik auf eine Widerstandsfähigkeit bzw. Unempfindlichkeit gegenüber

- 10 Veränderungen in den Parametern und Torsionsschwingungen der Achsen.  
Es ist für bekannte PI-Regelungen (Proportional- und Integralregelungen) und LQ-Regelungen (Linear-quadratische Regelungen) schwierig, die Empfindlichkeitscharakteristik und die komplementäre Empfindlichkeitscharakteristik gleichzeitig zu verbessern.

- Der Erfindung liegt daher die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit eines Motors derart auszugestalten, daß die Empfindlichkeitscharakteristik und die Verschleißfestigkeit gleichzeitig verbessert werden durch Bestimmen von geeigneten Frequenzgewichtungsfunktionen unter Zugrundelegung der  $H_\infty$ -Regelungstheorie.

- 15 Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß gelöst durch ein Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit eines mit variabler Geschwindigkeit betreibbaren Motors, der mittels einer Achse mit einer Last gekuppelt ist, unter Verwendung eines auf der  $H_\infty$ -Regelungstheorie basierenden Reglers, wobei der Regler eine Regelstrecke aufweist, die eine dem Motor zugeordnete Referenzregelstrecke und eine den Schwingungen der Achse zugeordnete Störungsregelstrecke, in Verbindung mit einer Empfindlichkeitsfunktion und einer komplementären Empfindlichkeitsfunktion umfaßt, gekennzeichnet durch die Verfahrensschritte:

- 25 a) Bestimmen einer ersten Frequenzgewichtungsfunktion mit einem größeren Wert in einem vorbestimmten niedrigen Frequenzbereich als in einem vorbestimmten höheren Frequenzbereich,  
b) Bestimmen einer zweiten Frequenzgewichtungsfunktion mit einem größeren Wert in dem höheren Frequenzbereich als in dem niedrigeren Frequenzbereich,  
c) Multiplizieren der Empfindlichkeitsfunktion mit der ersten Frequenzgewichtungsfunktion,  
30 d) Multiplizieren der komplementären Empfindlichkeitsfunktion mit der zweiten Frequenzgewichtungsfunktion,  
e) Bestimmen der  $H_\infty$ -Norm unter Verwendung der Multiplikationsergebnisse, so daß die  $H_\infty$ -Norm einen Wert annimmt, der kleiner als ein vorbestimmter Wert ist, und  
f) Bestimmen einer Übertragungsfunktion des Reglers unter Verwendung der  $H_\infty$ -Norm.

- 35 Durch die Anwendung der  $H_\infty$ -Regelungstheorie auf ein Geschwindigkeitsregelungssystem eines Motors liegt erfindungsgemäß ein gemischtes Empfindlichkeitsproblem vor, wobei die Empfindlichkeitsfunktion und die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion unabhängig voneinander mit den Frequenzgewichtungsfunktionen multipliziert werden, und die Frequenzgewichtungsfunktionen so gewählt werden, daß die  $H_\infty$ -Norm zur Bestimmung der Übertragungsfunktion des Reglers klein wird.

- 40 Gemäß der vorliegenden Erfindung können somit die Empfindlichkeitscharakteristik und die komplementäre Empfindlichkeitscharakteristik im Vergleich zu einer konventionellen PI-Regelung beide verbessert werden. Im Ergebnis kann dabei das Ansprechverhalten und das Reaktionsverhalten der Geschwindigkeitsregelung verbessert werden. Darüber hinaus ist das Geschwindigkeitsregelsystem derart ausgestaltet, daß es unempfindlich gegenüber Parameterveränderungen und Torsionsschwingungen der Achse ist.

- 45 Die Erfindung wird nachstehend anhand eines Ausführungsbeispiels unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher beschrieben. Es zeigen:

- Fig. 1 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Empfindlichkeitscharakteristik,  
Fig. 2 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der komplementären Empfindlichkeitscharakteristik,  
50 Fig. 3 eine graphische Darstellung der  $H_\infty$ -Norm,  
Fig. 4 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung der Geschwindigkeitsregelung des Motors gemäß einem Ausführungsbeispiel,  
Fig. 5 ein Blockschaltbild eines Geschwindigkeitsreglers zur Regelung eines Motors, bei dem eine veränderliche Regelstrecke bzw. eine Störungsregelstrecke berücksichtigt wird,  
55 Fig. 6 eine graphische Darstellung (Sigmaplot) einer Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  und von Regelstörungen  $\Delta_0$ ,  $\Delta_1$  und  $\Delta_2$ ,  
Fig. 7 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung eines bekannten, in einer Simulation verwendeten PI-Geschwindigkeitsregelungssystems,  
Fig. 8 ein Blockschaltbild zur Veranschaulichung eines in einer Simulation verwendeten  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystems,  
60 Fig. 9 eine graphische Darstellung zur Veranschaulichung der Ergebnisse der Simulation des bekannten PI-Geschwindigkeitsregelungssystems,  
Fig. 10 eine graphische Darstellung zur Veranschaulichung der Ergebnisse der Simulation des  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystems,  
65 Fig. 11a bis 11c graphische Darstellungen zur Veranschaulichung von Versuchsergebnissen an einer tatsächlichen Maschine in Verbindung mit dem bekannten PI-Geschwindigkeitsregelungssystem, und  
Fig. 12a bis 12c graphische Darstellungen zur Veranschaulichung von Versuchsergebnissen einer tatsächlichen Maschine in Verbindung mit dem  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystem.

Vor einer Beschreibung des Ausführungsbeispiels wird zuerst auf die  $H^\infty$ -Regelungstheorie eingegangen.

Im allgemeinen wird eine optimale Regelung erzielt durch Minimieren der Übertragungscharakteristik der Störungseingangsgröße zur geregelten Ausgangsgröße, so daß die Störungsgrößen den geringsten Einfluß auf die Ausgangsgröße der Regelung haben.

Die  $H^\infty$ -Regelungstheorie ist näher beschrieben in "Digital Control Systems" von C.H. Houpis, et al, McGraw-Hill, Inc., 1992, Seiten 600—602, oder in "Robust Electric Engineers of Japan, Vol. 110, No. 8, 1990, Seiten 649—652. Nach diesen Druckschriften bildet die  $H^\infty$ -Regelungstheorie die Basis für ein Verfahren zum Entwurf eines Regelungssystems zur Minimierung der Spitzenverstärkung der Übertragungsfunktion des Regelungssystems. Die Übertragungsfunktion, die in Verbindung mit der Regelungstheorie ein gemischtes Empfindlichkeitsproblem beschreibt, umfaßt die nachstehende Empfindlichkeitsfunktion und die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion:

#### (A) Empfindlichkeitsfunktion

In Fig. 1 bezeichnet K einen Regler (wobei sich K auch auf die Übertragungsfunktion des Reglers beziehen kann, wenn dies in der folgenden Beschreibung erforderlich ist), und P bezeichnet eine zu regelnde Einrichtung, beispielsweise einen Motor.

Bevorzugterweise sei der Fehler e immer Null, auch wenn Störungen  $w_1$  (als externe Eingangsgröße) addiert werden. Die Übertragungsfunktion der Störungen  $w_1$  zu dem Fehler e wird durch die folgende Gleichung ausgedrückt (1):

$$S = I/(I + KP) \quad (1)$$

wobei I eine Einheitsmatrix ist.

Diese Übertragungsfunktion S bildet im allgemeinen die Empfindlichkeitsfunktion. Da  $e = S \cdot w_1$ , kann der Einfluß der Störungen  $w_1$  auf den Fehler e durch Vermindern von S auf den kleinsten möglichen Wert minimiert werden.

In Fig. 1 bezeichnet  $W_1$  die Frequenzgewichtungsfunktion und  $Z_1$  die Ausgangsgröße der Regelung.

#### (B) Komplementäre Empfindlichkeitsfunktion

Es wird hier ebenfalls in idealisierender Weise angenommen, daß die Ausgangsgröße x der Einrichtung wie beispielsweise die Versetzung der Einrichtung 200 gemäß Fig. 2 stets Null ist, auch wenn beliebige Störungseingangsgrößen  $w_2$  addiert werden. Die Übertragungsfunktion der Störungseingangsgröße  $w_2$  zur Ausgangsgröße x der Einrichtung bzw. Regelstrecke kann durch die nachfolgenden Gleichungen (2) und (3) ausgedrückt werden:

$$-T = -KP/(I + KP) \quad (2)$$

$$T = KP/(I + KP) \quad (3)$$

Diese Übertragungsfunktion T wird im allgemeinen als die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion angesehen. Da  $x = T \cdot w_2$ , kann der Einfluß der Störungseingangsgröße  $w_2$  auf die Ausgangsgröße x der Einrichtung durch Vermindern von T auf den kleinsten möglichen Wert minimiert werden.

In Fig. 2 bezeichnet  $-W_2$  die Frequenzgewichtungsfunktion und  $Z_2$  die Ausgangsgröße der Regelung.

Die Empfindlichkeitsfunktion S und die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion T weisen den nachfolgenden, aus den Gleichungen (1) und (3) abgeleiteten Zusammenhang auf.

$$S + T = I/(I + KP) + KP/(I + KP) = I \quad (4)$$

Gleichung (4) kann in einfacher Weise entnommen werden, daß eine erforderliche Verminderung der Empfindlichkeitsfunktion S, wie im vorhergehenden Abschnitt (A) beschrieben, zu einer Vergrößerung der komplementären Empfindlichkeitsfunktion T führt, während eine Verminderung der komplementären Empfindlichkeitsfunktion T zu einer Vergrößerung der Empfindlichkeitsfunktion S führt. Die Empfindlichkeitsfunktion S und die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion T haben somit jeweils eine umgekehrte Abhängigkeit voneinander, so daß sie folglich nicht zur gleichen Zeit vermindert werden können.

Das Regelungsverfahren gemäß dem vorliegenden Ausführungsbeispiel vermindert die Empfindlichkeitsfunktion S in einem Bereich, in welchem eine hohe Empfindlichkeitscharakteristik erforderlich ist, ohne Verminderung der komplementären Empfindlichkeitsfunktion T, und vermindert die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion T in einem Bereich, in dem eine hohe komplementäre Empfindlichkeitscharakteristik erforderlich ist, ohne Verminderung der Empfindlichkeitsfunktion S.

Zu diesem Zweck werden die Funktionen S und T mit den Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  gemäß Fig. 1 bzw. Fig. 2 multipliziert und die dem Regler K entsprechende Gleichung (5) wird unter Verwendung der  $H^\infty$ -Norm erhalten.

$$\left\| \begin{array}{c} W_1 S \\ W_2 T \end{array} \right\|_\infty < \gamma \quad (5)$$

In Gleichung (5) sei der Wert  $\gamma$  gleich 1, obwohl  $\gamma$  auch einen beliebigen anderen Wert annehmen kann.

Die  $H_\infty$ -Norm ist der absolute Maximalwert der Übertragungsfunktion. Beispielsweise ist die  $H_\infty$ -Norm einer skalaren Übertragungsfunktion durch die folgende Gleichung (6) ausgedrückt.

$$\|G\|_\infty = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} |G(j\omega)| \quad (6)$$

Gemäß Fig. 3 bezieht sich insbesondere die  $H_\infty$ -Norm auf die Entfernung zwischen dem Ursprungspunkt und dem davon am weitesten entfernten Punkt entsprechend der Vektordarstellung (vektorieller Ort) der Übertragungsfunktion  $G$ .

Im Gegensatz dazu kann die  $H_\infty$ -Norm für den Fall, daß die Übertragungsfunktion  $G$  durch eine Matrix dargestellt ist, im allgemeinen mittels der Gleichung (7) ausgedrückt werden.

$$\|G\|_\infty = \max_{0 \leq \omega \leq \infty} [\lambda_{\max} \{G^T(-j\omega) G(j\omega)\}]^{1/2} \quad (7)$$

In Gleichung (7) ist  $\lambda_{\max}$  der maximale Eigenwert der Matrix  $G$ .

Mit der Anwendung der  $H_\infty$ -Regelungstheorie auf ein Geschwindigkeitsregelungssystem eines Motors liegt hier ein sogenanntes gemischtes Empfindlichkeitsproblem vor, wodurch es möglich ist, einen Regler  $K$  zu entwerfen, der sowohl die Empfindlichkeitscharakteristik als auch die komplementäre Empfindlichkeitscharakteristik verbessern kann, indem die Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  derart ausgewählt werden, so daß die durch Gleichung (5) ausgedrückte  $H_\infty$ -Norm vermindert wird.

Desweiteren zeigt Fig. 4 ein Blockschaltbild eines Ausführungsbeispiels des Geschwindigkeitsregelungssystems, bei welchem die  $H_\infty$ -Regelungstheorie in Verbindung mit einer Regelung eines Gleichstrommotor-Anwendung findet, bei dem Torsionsschwingungen seiner Achse auftreten.

Das Geschwindigkeitsregelungssystem kann grob in ein Stromregelungssystem 100 und ein mechanisches System 200 aufgeteilt werden. Das mechanische System umfaßt dabei einen Gleichstrommotor 210 und eine Last 230, die mittels einer als ein elastischer Körper zu betrachtende Achse 220 gekuppelt sind.

In Fig. 4 bezeichnet  $n_M$  eine Motorgeschwindigkeit,  $n_L$  eine Lastgeschwindigkeit,  $\tau_C$  ein Drehmoment an der Achse,  $\tau_M$  ein Motordrehmoment,  $\tau_L$  Störungen des Lastdrehmoments,  $\tau_{MO}$  eine Regelungseingangsgröße (Führungsgröße),  $B_M$  einen Viskosedämpfungskoeffizienten des Motors,  $B_L$  einen Viskosedämpfungskoeffizienten der Last,  $T_M$  eine mechanische Zeitkonstante des Motors,  $T_L$  eine mechanische Zeitkonstante der Last,  $T_C$  die Federungszeitkonstante der Achse und  $f$  eine Rückkopplungsverstärkung der Geschwindigkeit des Motors.

Unter der Annahme, daß  $n_M/\tau_{MO}$  als Regelstrecke bzw. Einrichtung  $G$  bezeichnet wird, die eine Störungsregelstrecke  $\Delta$ , die beispielsweise die Torsionsschwingungen der Achse und Parameteränderungen umfaßt, kann die Regelstrecke  $G$  durch Gleichung (8) ausgedrückt werden:

$$G = \frac{1}{s T_M + (B_M + f)} \left[ 1 + \frac{(\omega_1^2 - \omega_0^2) s + \frac{B_L}{T_M T_L T_C}}{s^3 + \frac{T_M B_L + T_L (B_M + f)}{T_M T_L} s^2 + \left\{ \omega_0^2 + \frac{B_L (B_M + f)}{T_M T_L} \right\} s + \frac{B_M + B_L + f}{T_M T_L T_C}} \right] \quad (8)$$

worin  $s$  den Parameter der Laplace-Transformation bzw. des Laplace-Transformationsoperators bezeichnet und ferner gilt:

$$\omega_0^2 = (T_M + T_L) T_M T_L T_C, \text{ und } \omega_1^2 = 1/T_L T_C.$$

Wird der Nenner im zweiten Ausdruck der eckigen Klammer auf der rechten Seite von Gleichung (8) als die Störungsregelstrecke  $\Delta$ , die durch die Torsionsschwingungen und derartigen gebildet wird, sowie der Multiplikator  $1 / [s T_M + (B_M + f)]$  der rechten Seite der Gleichung als die Referenzregelstrecke  $P_0$  angesehen, kann Gleichung (8) in der folgenden Weise umgeformt werden:

$$G = P_0 (1 + \Delta) \quad (9)$$

Bei diesem Ausführungsbeispiel ist die Referenzregelstrecke  $P_0$  dem Gleichstrommotor zugeordnet, der als fester Körper betrachtet werden kann, während die Störungsregelstrecke  $A$  den Schwingungsanteilen des Achsensystems und des Lastsystems zugeordnet ist. Die  $H_\infty$ -Regelungstheorie wird angewendet zur Geschwindigkeitsregelung des Gleichstrommotors. Auf diese Weise ist es möglich, gleichzeitig die Anforderungen der Empfindlichkeitscharakteristik und der Verschleißfestigkeit bzw. Verschleißunempfindlichkeit zu erfüllen, die mit konventionellen PI-Regler oder LQ-Reglern nicht erfüllt werden können.

Fig. 5 zeigt ein Blockschaltbild dieses Systems, bei welchem die Servoregelung einen Integrator ( $1/s$ ), der vor der Referenzregelstrecke  $P_0$  angeordnet ist, umfaßt, wobei ein Typ-1-Regelungssystem gebildet wird.

Nach Gleichung (5) wird die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  in einem Frequenzbereich (beispielsweise  $0-15$  rad/s), in dem die Regelung ausgeführt wird, auf einen größeren Wert gesetzt, so daß die mit  $W_1$  multiplizierte Empfindlichkeitsfunktion  $S$  in dem niedrigen Frequenzbereich kleiner ist als in einem höheren Frequenzbereich (beispielsweise bei mehr als  $30$  rad/s). Im Gegensatz dazu wird die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  in dem höheren Frequenzbereich, in dem Hochfrequenzkomponenten des mechanischen Systems und der Störungsregelstrecke vorhanden sind, auf einen größeren Wert gesetzt, so daß die mit  $W_2$  multiplizierte komplementäre Empfindlichkeitsfunktion  $T$  im höheren Frequenzbereich kleiner ist als im niedrigen Frequenzbereich.

Die Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  werden unter Berücksichtigung dieser Bedingungen bestimmt, so daß eine die Bedingungen der Gleichung (5) erfüllende Übertragungsfunktion  $K$  des Reglers erhalten wird. Gemäß dem vorliegenden Ausführungsbeispiel wird somit ein gemischtes Empfindlichkeits- bzw. Ansprechproblem beschrieben, bei dem die  $H_\infty$ -Regelungstheorie auf ein Geschwindigkeitsregelungssystem eines Gleichstrommotors angewendet wird.

Im einzelnen werden dabei die Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  gemäß der nachstehenden Beschreibung bestimmt. Zuerst wird die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  derart bestimmt, daß sie größere Werte annimmt als die Störungsregelstrecke  $\Delta$  entsprechend den folgenden Bedingungen. Obwohl in bevorzugter Weise die Bandbreite der Geschwindigkeitsregelung so breit wie möglich sein soll, ist sie gemäß dem Stand der Technik etwa  $20$  rad/s. Entsprechend dieser Bedingung und dem Einfluß von Störungen (Rauschen) und Parameteränderungen, ist die Empfindlichkeit im höheren Frequenzbereich über  $30$  rad/s zu vermindern. Zu diesem Zweck wird die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  derart bestimmt, daß sie bis in die Nähe von  $30$  rad/s ansteigt und ihre Verstärkung wird derart bestimmt, daß sie über der Störungsregelstrecke  $\Delta$  liegt.

Andererseits muß die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  im niedrigen Frequenzbereich eine höhere Verstärkung aufweisen. Die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  umfaßt dabei den Ausdruck  $1/s$  zur Erzielung einer unendlich großen Verstärkung bei der Frequenz Null. Darüber hinaus wird die Verstärkung derart bestimmt, daß sie unter  $15$  rad/s erheblich vermindert ist, wobei berücksichtigt wird, daß die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  bei  $30$  rad/s anzusteigen beginnt. Entsprechend einem empirischen Verfahren wird die Verstärkung mit Zehn multipliziert. Obwohl vorzugsweise der Grad bzw. die Ordnung der Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  zur Verminderung ihrer Verstärkung im höheren Frequenzbereich so groß wie möglich gewählt werden soll, wird ihr Grad auf Zwei gesetzt, da bei ansteigendem Grad der Regler  $K$  erheblich komplizierter wird.

Ein Verfahren zur Bestimmung der Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  wird nachstehend im einzelnen beschrieben.

Gemäß der vorstehenden Definition der Referenzregelstrecke  $P_0$  wird die Referenzregelstrecke  $P_{0s}$  durch Gleichung (10) in Verbindung mit den Designparametern gemäß Tabelle 1 repräsentiert.

$$P_{0s} = \frac{P_0}{s} = \frac{1}{s\{s T_M + (B_M + f)\}} = \frac{1.6667}{s^2 + 138.88 s} \quad (10)$$

Tabelle 1

$T_M$	600 [ms]
$T_L$	200 - 1000 [ms]
$T_C$	0.5 [ms]
$B_M$	0.01
$B_L$	0.01
$f$	83.3

Die Störungsregelstrecken  $\Delta_0$ ,  $\Delta_1$  und  $\Delta_2$  werden für  $T_L = 200, 400$  und  $1000$  ms durch die Gleichungen (11),

(12) und (13) beschrieben.

$$\Delta_0 = \frac{-3333.3s - 83.333}{s^3 + 138.88s^2 + 8336.8s + 694330} \quad (11)$$

$$\Delta_1 = \frac{-3333.3s - 166.67}{s^3 + 138.9s^2 + 10007s + 1388700} \quad (12)$$

$$\Delta_2 = \frac{-3333.3s - 33.333}{s^3 + 138.86s^2 + 2001.4s + 277730} \quad (13)$$

Es wird dabei gefordert, daß die Verschleißfestigkeit bzw. Verschleißunempfindlichkeit aufrechterhalten wird, auch wenn die Störungsregelstrecke  $\Delta$  sich gemäß den Gleichungen (11) bis (13) ändert.

Unter der Annahme, daß die Position des die Störungsregelstrecke  $\Delta$  in Fig. 5 repräsentierenden Blocks derjenigen der Frequenzgewichtungsfunktionen  $-W_2$  gemäß Fig. 2 entspricht, kann ein stabiler Regler K durch Ersetzen von A durch  $-W_2$  erhalten werden. Hierbei ist die Erhaltung der Verschleißfestigkeit gesichert, falls Gleichung (5) erfüllt ist unter der Bedingung, daß die Frequenzgewichtungsfunktion  $-W_2$  die Gleichung (14) für alle möglichen Störungsregelstrecken A bzw. Störungen erfüllt.

$$|-W_2| > |\Delta| \quad (14)$$

Da die beiden Ausdrücke (14) und (15) äquivalent sind, wird eine den Ausdruck (15) erfüllende Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  bestimmt, so daß  $W_2$  größer als jede Störungsregelstrecke bzw. Störung ist.

$$|W_2| > |\Delta| \quad (15)$$

Nachstehend wird nun ein spezielleres Verfahren zur Bestimmung der Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  beschrieben. Gemäß der vorstehenden Beschreibung ist die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  derart bestimmt, daß der Ausdruck (15) erfüllt ist. Da jedoch die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  eine umgekehrte Abhängigkeit von der Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  aufweist, wird  $W_2$  derart bestimmt, daß ihr der Verstärkung eines Bode-Amplitudendiagramms einer Übertragungsfunktion mit einer Eingangsgröße und einer Ausgangsgröße entsprechendes Sigma-Plot im niedrigen Frequenzbereich vermindert wird und im höheren Frequenzbereich, in dem die Verschleißfestigkeit wichtig wird, vergrößert wird.

Obwohl eine Vergrößerung von  $W_2$  eine relative Verminderung der komplementären Empfindlichkeitsfunktion T bewirkt, kann die Bandbreite der komplementären Empfindlichkeitsfunktion T erweitert werden, wenn die Frequenz des Anstiegs des Sigma-Plots der Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  ansteigt, da die Funktion T eine Übertragungsfunktion eines geschlossenen Kreises bzw. Regelkreises ist.

Zur Bildung eines Reglers unter Verwendung der  $H_\infty$ -Regelungstheorie wird das bekannte Glover-Doyle-Verfahren verwendet. Dieses Verfahren erfordert eine erfüllbare Bedingung, daß der Zähler und Nenner des Produkts  $W_2 \cdot P_{OS}$  gleiche Ordnung haben müssen. Unter Berücksichtigung dieser Bedingung ist die Ordnung von  $W_2$  zu Zwei bestimmt, entsprechend dem Unterschied der Ordnungen des Zählers und Nenners von  $P_{OS}$ .

Gleichung (16) beschreibt die entsprechend dem vorstehend beschriebenen Verfahren ausgedrückte Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$ , während Fig. 6 die Sigma-Plots von  $W_2$ ,  $\Delta_0$ ,  $\Delta_1$  und  $\Delta_2$  veranschaulicht.

$$W_2 = (s + 30)(s + 40)/2000 \quad (16)$$

Nachstehend wird nun im einzelnen ein Verfahren zur Bestimmung der Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  beschrieben.

Die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  wird derart bestimmt, daß sie in dem niedrigen Frequenzbereich große Werte und in dem höheren Frequenzbereich kleine Werte annimmt. Die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  hat dabei den ursprünglichen Pol, da die Referenzregelstrecke  $P_{OS}$  den ursprünglichen Pol aufweist. Darüber hinaus ist die Verstärkung der Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  im niedrigen Frequenzbereich zur Aufrechterhaltung der umgekehrten Abhängigkeit zwischen den Funktionen  $W_1$  und  $W_2$  auf große Werte gesetzt, und das Sigma-Plot der Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  ist derart bestimmt, daß sie im Kennlinienverlauf von links nach rechts in der Nähe der Frequenz, bei welcher der Sigma-Plot der Funktion  $W_2$  ansteigt, stark abfällt.

Da die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  große Werte im niedrigen Frequenzbereich und kleinere Werte im höheren Frequenzbereich annimmt, ist es um so besser, je höher die Ordnung von  $W_1$  ist. Die Ordnung ist jedoch

# DE 43 33 146 A1

auf den Wert Zwei oder niedriger gesetzt, da eine höhere Ordnung auch einen Regler höherer Ordnung erforderlich macht. Entsprechend ist die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  durch Gleichung (17) bestimmt.

$$W_1 = 150/s(s + 15) \quad (17)$$

Darüber hinaus ist die Übertragungsfunktion  $K$  des Reglers durch Gleichung (18) bestimmt.

$$K = \frac{22146 s^2 + 3459700 s + 53345000}{s^3 + 109.2 s^2 + 4429.2 s + 45244} \quad (18)$$

In der Praxis wird die Übertragungsfunktion  $K$  im Rahmen des Einsatzes eines kommerziellen CAD-Systems, wie beispielsweise PC-MATLAB, gewonnen, wobei die Übertragungsfunktion  $K$  unter Verwendung des Glover-Doyle-Verfahrens aus den Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  sowie der Referenzregelstrecke  $P_0$  berechnet wird.

Simulationsergebnisse aus dem Vergleich der bekannten PI-Regelungstheorie und des Regelungsverfahrens auf der Basis der  $H_\infty$ -Regelungstheorie werden nachstehend beschrieben.

Fig. 7 zeigt ein Blockschaltbild des bekannten PI-Geschwindigkeitsregelungssystems und Fig. 8 ein Blockschaltbild des  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystems. Bei diesen Systemen wird die Geschwindigkeit bzw. die Geschwindigkeitsantwort  $n_M$  des Motors überwacht, wobei als Eingangsgröße eine Sprungfunktion mit 2% der Amplitude der Nenngeschwindigkeit als Regelungs- bzw. Führungsgröße  $n_0$ , sowie eine Laststörgröße von 50% des Lastdrehmoments  $\tau_L$  eingegeben wird. Fig. 9 zeigt entsprechend die Ergebnisse des bekannten PI-Geschwindigkeitsregelungssystems, während Fig. 10 Ergebnisse zeigt, die mittels des  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystems erhalten wurden. Der Abschnitt b in Fig. 9 zeigt die Schwingungen der Achse.

Aus den Fig. 9 und 10 ist ersichtlich, daß das  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystem im Vergleich zum bekannten PI-Geschwindigkeitsregelungssystem den Zielpunkt der Geschwindigkeit früher erreicht, überlegener in dem Geschwindigkeitsreaktionsverhalten und in der Begrenzung von Schwingungen nach dem Auftreten von Laststörungen ist.

Nachstehend werden Ergebnisse von Versuchen mit Versuchsanordnungen entsprechend den Parametern der Tabelle 2 in Verbindung mit den Fig. 11A bis 11C und 12A bis 12C beschrieben. Die Fig. 11A bis 11C veranschaulichen die Ergebnisse des bekannten PI-Geschwindigkeitsregelungssystems, während die Fig. 12A bis 12C die Ergebnisse des  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystems veranschaulichen.

Tabelle 2

PARAMETER DER VERSUCHSANORDNUNG		
MOTOR	LEISTUNG	22 [KW]
	GESCHWINDIGKEIT	3000/1750 [U/min]
	ZEITKONSTANTE $T_M$	504 [ms]
LAST	LEISTUNG	22 [KW]
	GESCHWINDIGKEIT	3000/1750 [U/min]
	ZEITKONSTANTE $T_L$	504 [ms]
ACHSE	ZEITKONSTANTE $T_C$	0.456 [ms]
FREQUENZ D. ACHSENSCHWINGUNG		14.8 [Hz]

Die Versuchsergebnisse, die unter Verwendung von realen Maschinen erhalten wurden, umfassen tatsächliche Werte der Motorgeschwindigkeit (Fig. 11B und 12B), sowie die Ausgangsgröße des Reglers (Fig. 11C und 11D) bei einer Eingangssprungfunktion mit einer Amplitude von 5% der Nenngeschwindigkeit (Fig. 11A und 12A) als Führungsgröße der Regelung. Aus dem Vergleich der Fig. 11A bis 12C ergibt sich, daß die im bekannten PI-Geschwindigkeitsregelungssystem aufgetretenen Torsionsschwingungen der Achse im  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystem begrenzt werden konnten. Das beschriebene  $H_\infty$ -Geschwindigkeitsregelungssystem kann nicht nur bei Gleichstrommotoren sondern auch bei Wechselstrommotoren wie beispielsweise Induktionsmotoren Anwendung finden.

Das Verfahren zur Regelung eines mit variabler Geschwindigkeit betreibbaren Motors 210 mit einer über eine Achse 220 angekuppelten Last 230 umfaßt somit einen auf der Basis der  $H_\infty$ -Regelungstheorie gebildeten

Regler K. Eine Empfindlichkeitsfunktion S und eine komplementäre Empfindlichkeitsfunktion T werden in diesem Regelungssystem definiert. Das Regelungssystem weist eine Regelstrecke G auf, die eine Referenzregelstrecke  $P_0$  (Motor) und ein Störungsregelstrecke  $\Delta$  (Schwingungen der Achse) umfaßt. Die Empfindlichkeitsfunktion S und die komplementäre Empfindlichkeitsfunktion T werden jeweils mit Frequenzgewichtungsfunktionen  $W_1$  und  $W_2$  entsprechend multipliziert und die  $H_\infty$ -Norm bestimmt. Die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_1$  wird in einem niedrigen Frequenzbereich auf einen großen Wert gesetzt, während die Frequenzgewichtungsfunktion  $W_2$  auf einen großen Wert in einem höheren Frequenzbereich gesetzt wird. Die Übertragungsfunktion K des Reglers wird aus der ermittelten  $H_\infty$ -Norm bestimmt. Die Empfindlichkeitscharakteristik wie das Ansprechverhalten oder das Reaktionsverhalten des Motors werden verbessert und die Verschleißunempfindlichkeit bzw. Verschleißfestigkeit werden erhöht.

#### Patentanspruch

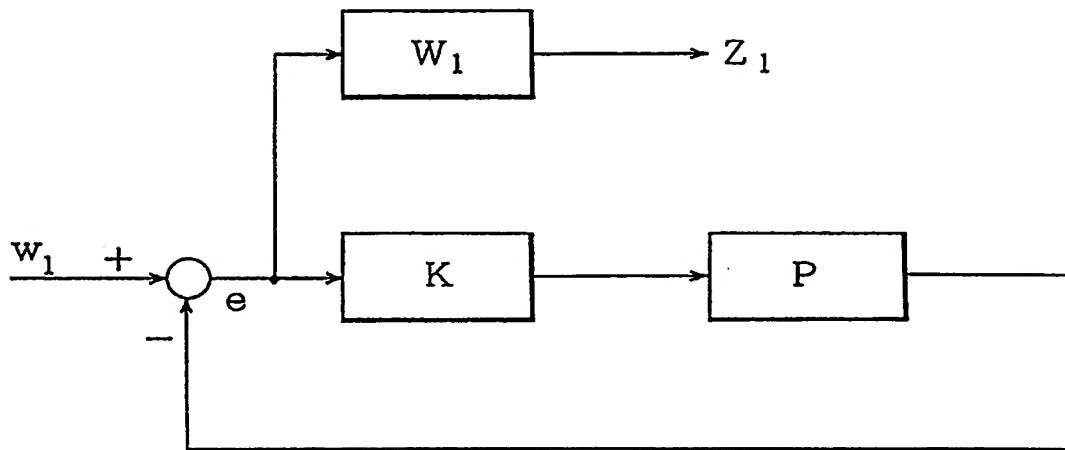
Verfahren zur Regelung der Geschwindigkeit eines mit variabler Geschwindigkeit betreibbaren Motors, der mittels einer Achse mit einer Last gekuppelt ist, unter Verwendung eines auf der  $H_\infty$ -Regelungstheorie basierenden Reglers, wobei der Regler eine Regelstrecke aufweist, die eine dem Motor zugeordnete Referenzregelstrecke und eine den Schwingungen der Achse zugeordnete Störungsregelstrecke, in Verbindung mit einer Empfindlichkeitsfunktion und einer komplementären Empfindlichkeitsfunktion umfaßt, gekennzeichnet durch die Verfahrensschritte:

- a) Bestimmen einer ersten Frequenzgewichtungsfunktion ( $W_1$ ) mit einem größeren Wert in einem vorbestimmten niedrigen Frequenzbereich als in einem vorbestimmten höheren Frequenzbereich,
- b) Bestimmen einer zweiten Frequenzgewichtungsfunktion ( $W_2$ ) mit einem größeren Wert in dem höheren Frequenzbereich als in dem niedrigeren Frequenzbereich,
- c) Multiplizieren der Empfindlichkeitsfunktion mit der ersten Frequenzgewichtungsfunktion ( $W_1$ ),
- d) Multiplizieren der komplementären Empfindlichkeitsfunktion mit der zweiten Frequenzgewichtungsfunktion ( $W_2$ ),
- e) Bestimmen der  $H_\infty$ -Norm unter Verwendung der Multiplikationsergebnisse, so daß die  $H_\infty$ -Norm einen Wert annimmt, der kleiner als ein vorbestimmter Wert ist, und
- f) Bestimmen einer Übertragungsfunktion des Reglers (K) unter Verwendung der  $H_\infty$ -Norm.

Hierzu 11 Seite(n) Zeichnungen



- Leerseite -



**FIG. 1**

\*

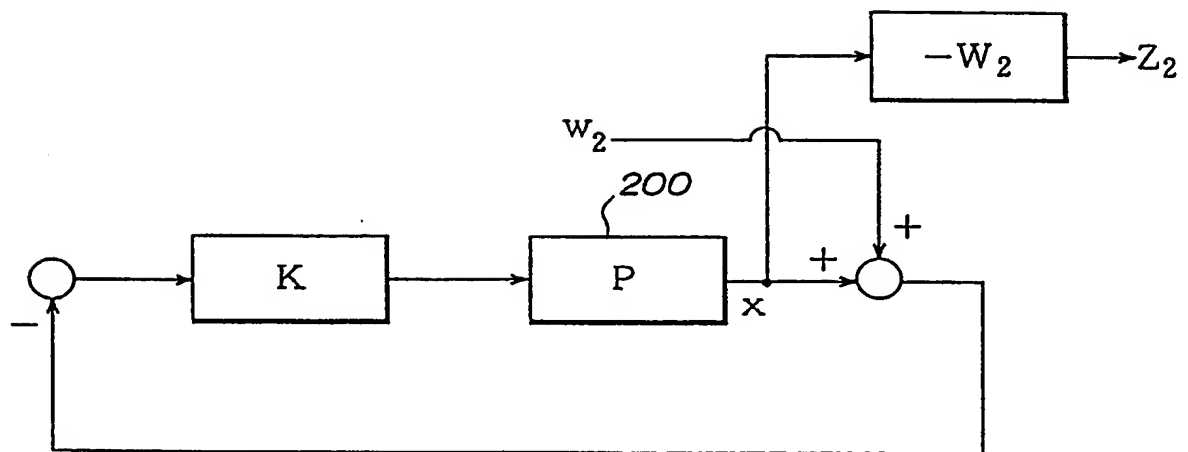
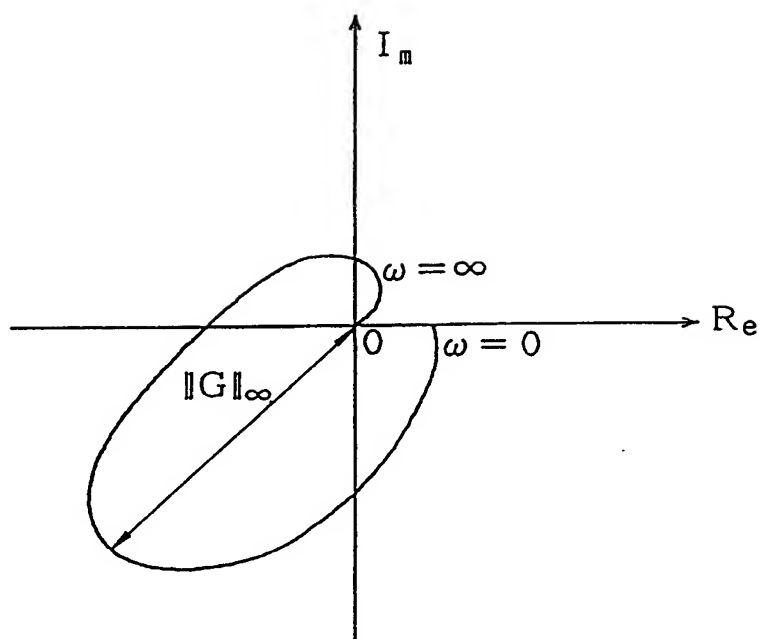


FIG. 2



**FIG.3**

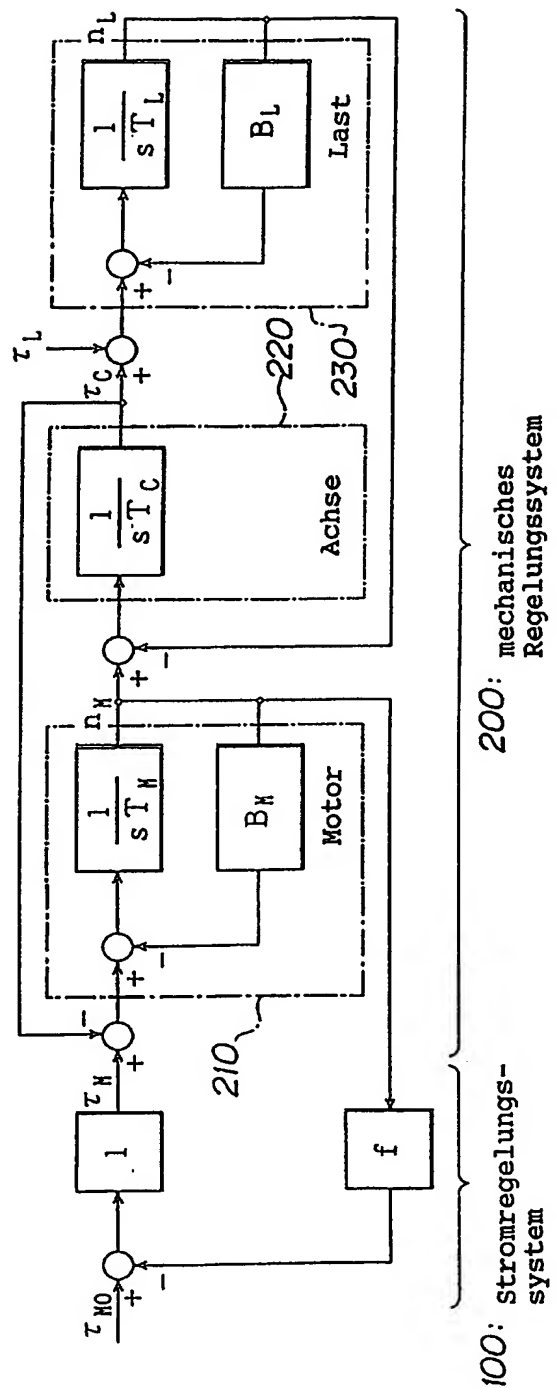
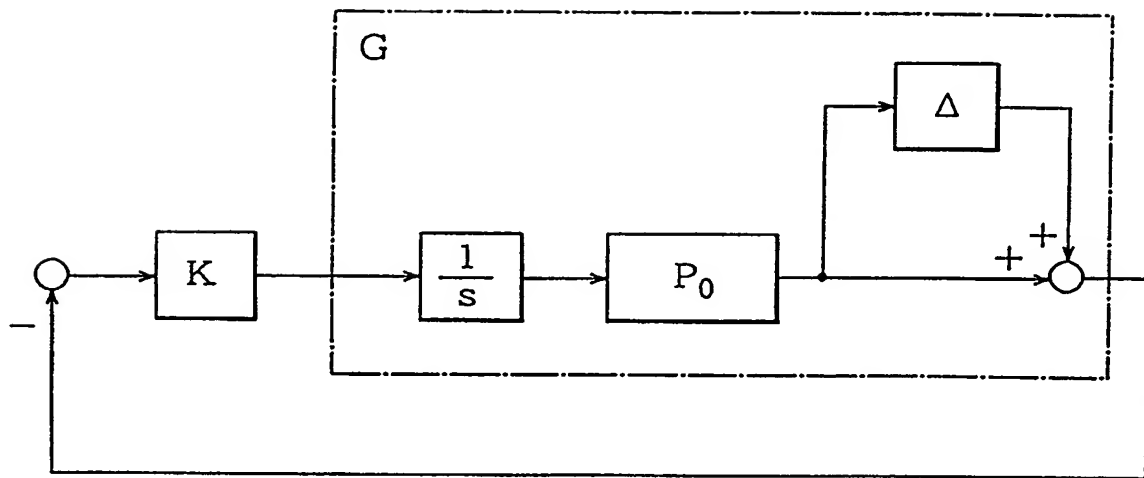


FIG. 4



*FIG. 5*

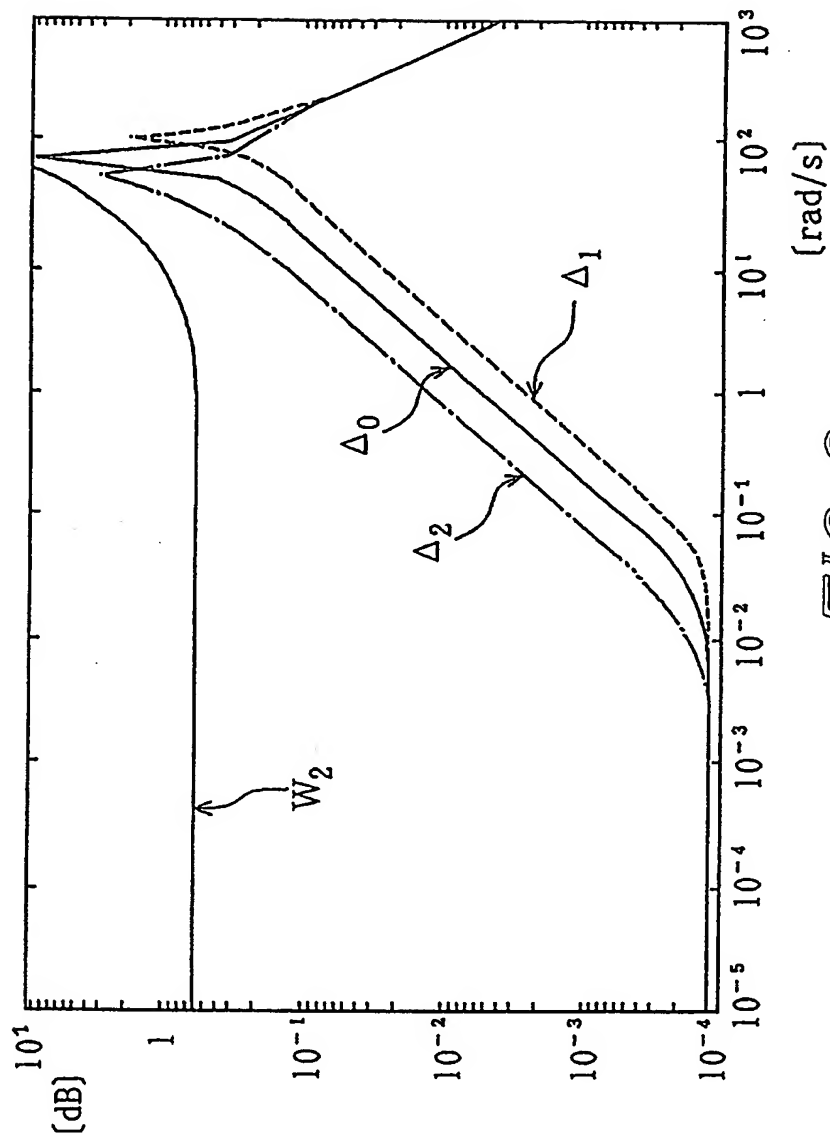


FIG. 6

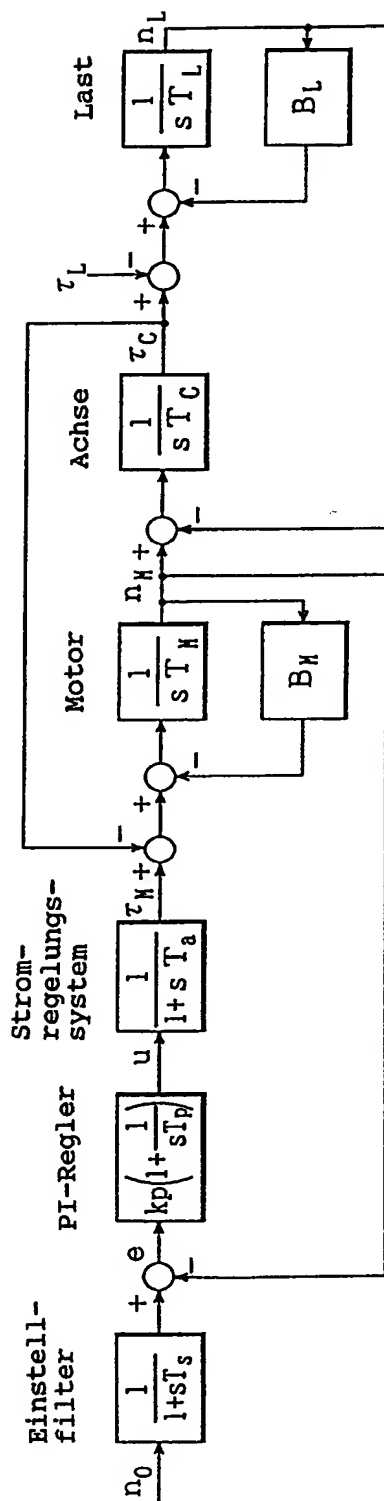


FIG. 7

(Stand der Technik)



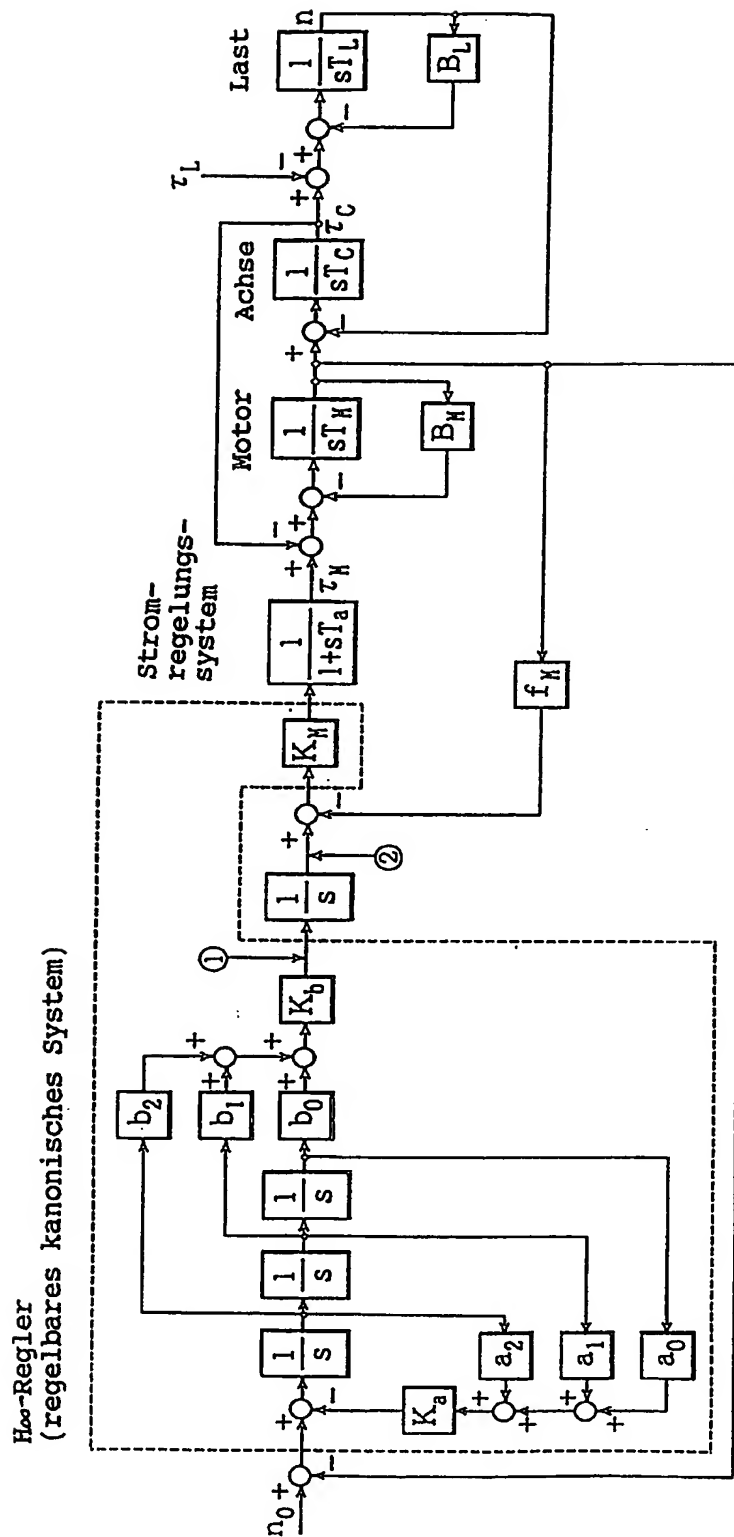
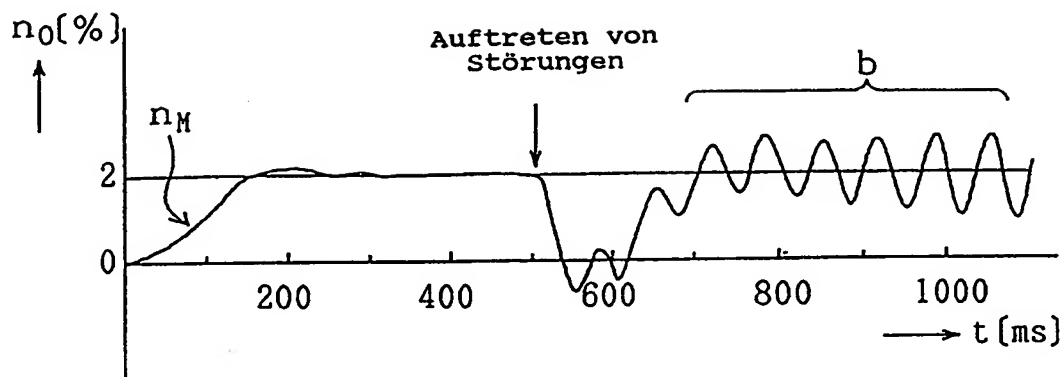
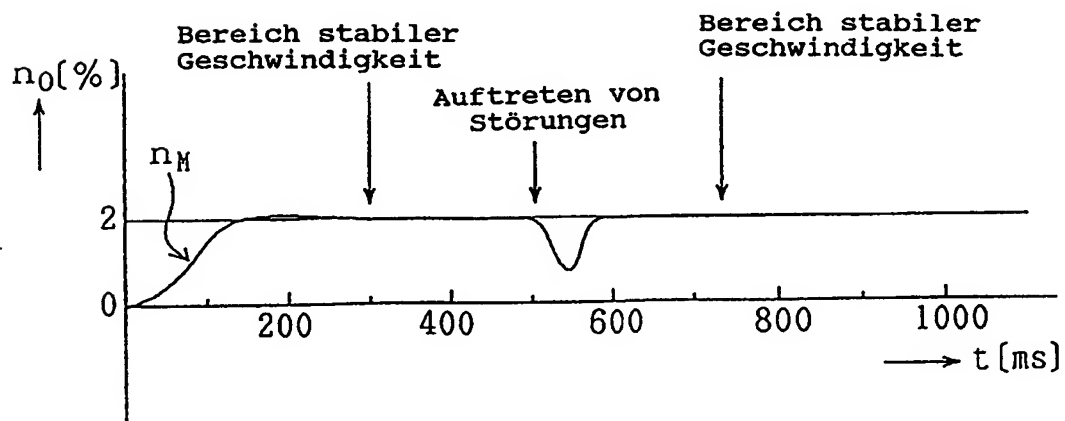


FIG. 8

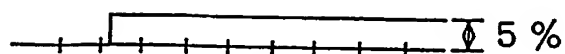


**FIG. 9**  
(Stand der Technik)



**FIG. 10**

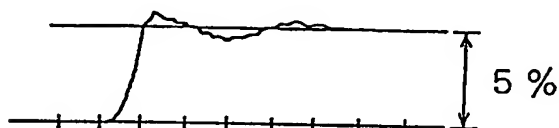
Geschwindigkeits-  
Führungsgröße



**FIG. 11A**

(Stand der Technik)

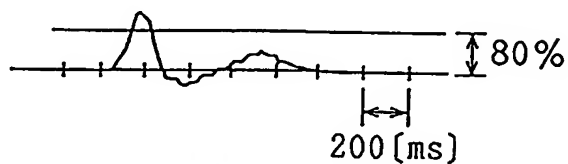
tatsächlicher  
Geschwindigkeitswert



**FIG. 11B**

(Stand der Technik)

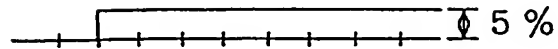
Regler-  
Ausgangsgröße



**FIG. 11C**

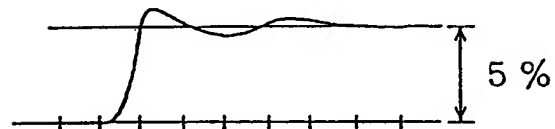
(Stand der Technik)

Geschwindigkeits-  
Führungsgröße



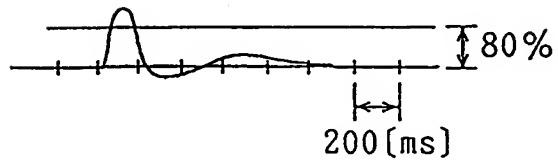
**FIG. 12 A**

tatsächlicher  
Geschwindigkeitswert



**FIG. 12 B**

Regler-  
Ausgangsgröße



**FIG. 12 C**